

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN BUKAAN BADAN PADA
BERBAGAI VARIASI RASIO TULANGAN**
*Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beam with Web-Opening under
Reinforcement Ratio Variations*

Moh. Zaenuddin*, Akmaluddin*, Ni Nyoman Kencanawati**

* Universitas Al Azhar, Jl. Unizar No. 20 Turida Mataram

** Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram, Jl Majapahit 62 Mataram

email : mzain.karza64@gmail.com, akmaluddin@unram.ac.id, nkencanawati@ts.ftunram.ac.id

Abstrak

Adanya lubang pada badan balok untuk keperluan wadah instalasi mechanical dan electrical seperti instalasi AC sentral, listrik, supply air, pembuangan air kotor pada bangunan bertingkat akan mengurangi kekakuan dari struktur balok beton tersebut. Penentuan titik lubang menjadi permasalahan. Untuk itu yang menarik perhatian dalam menentukan rasio tulangan pada balok beton lubang. Pengaruh beban maksimum dan gaya geser yang tidak aman dan dapat diterapkan rasio tulangan pada balok beton lubang yang aman sesuai fungsi tulangan. Pembuatan titik lubang pada balok, maka distribusi kekuatan dan kekakuan (EI) balok tidak merata, perlu diteliti dalam beban ultimit (P_u) pada balok, perilaku balok beton lubang dengan tiga variasi rasio rendah, sedang, tinggi. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui kapasitas beban maksimum, perilaku lentur, perbandingan nilai uji lentur secara analitis dan secara uji laboratorium. Semua balok diuji dengan menggunakan mesin pengujian kapasitas 25 ton. Balok beton bukaan badan (web-opening) diletakkan pada dua perletakkan sederhana dengan bentang 275 cm. Dua beban tersebut di tempatkan secara simetris sepanjang bentang balok. Jarak antar beban tersebut 91,67 cm. Berdasarkan hasil pengujian dan hasil analisis data yang sudah dilakukan maka didapat : Kekuatan balok yaitu : Pada saat beban retak pertama (P_u), kuat lentur ultimit balok dengan nilai momen ultimit (M_u) paling besar terjadi pada balok beton lubang tengah (BBLT) rasio tinggi sebesar 76,237 kN.m, lebih besar dari momen ultimit balok beton normal (BBN) sebesar 53,838 kN.m kapasitas momen naik sebesar 41,604 % , dengan perbandingan rasio 1,664 dan 1,884. Rasio perbandingan momen ultimit paling besar terjadi pada balok beton lubang tengah (BBLT) rasio tulangan rendah dengan rasio perbandingan sebesar 2,109. Kekakuan balok yaitu : Pada beban ultimit (P_u), lendutan (δ_u) paling besar terjadi pada balok beton lubang tengah (BBLT), rasio tulangan rendah 0,707 % sebesar 28,370 mm dengan rasio sebesar 11,016 %, . Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, maka dapat disarankan bahwa perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan membuat variasi rasio tulangan yang optimum dengan variasi rasio tulangan yang berbeda-beda menghasilkan kuat lentur yang maksimum. Diperlukan alat untuk mendeteksi keretakan pada balok beton lubang supaya lebih dini diketahui dan diamati untuk mendapatkan data yang representatif.

Kata kunci : Perilaku lentur, balok beton, bukaan badan, rasio tulangan

PENDAHULUAN

Beton bertulang adalah komposisi dari dua material yaitu beton dan baja tulangan yang menjadi satu kesatuan lekatan yang memungkinkan kedua bahan tersebut saling bekerja sama secara struktural. Kerjasama kedua material ini masing-masing melaksanakan fungsi maksimalnya dalam struktur beton bertulang yaitu beton menahan tegangan tekan dan baja tulangan menahan tegangan tarik.

Pembangunan bangunan-bangunan bertingkat baik yang sudah jadi maupun yang sedang dibangun, sering dijumpai pipa dan service duct yang dibutuhkan untuk supply air, pembuangan air kotor, instalasi AC sentral, listrik, telepon dan jaringan komputer. Instalasi pipa dan ducting mechanical dan electrical tersebut tidak jarang ditempatkan di bawah balok sehingga akan mengurangi tinggi efektif ruangan suatu

bangunan. Penempatan pipa di bawah balok akan mengurangi ketinggian ruangan dan berpengaruh pada jumlah tingkat dari bangunan dimana ketinggian bangunan tersebut harus memenuhi persyaratan yang telah ditentukan. Bangunan yang tidak bertingkat, penambahan ketinggian bangunan guna instalasi pipa dan ducting ini tidak cukup berarti terhadap penambahan biaya secara keseluruhan, akan tetapi untuk bangunan bertingkat banyak, multistory building sangat berarti terhadap penambahan biaya apabila dikalikan dengan jumlah tingkat.

Untuk pemasangan pipa yang berukuran kecil yang diperhitungkan tidak cukup berarti mengurangi kekuatan struktur balok beton bertulang jadi pemasangan pipa tersebut dapat diijinkan ditanam pada balok. Tetapi jika lubang tersebut berukuran besar akan dapat mengurangi kekuatan struktur balok atau terjadi perlemahan balok, maka perlu dilakukan peninjauan desain terhadap struktur balok beton tersebut. Suatu struktur harus aman terhadap keruntuhan sehingga tidak menimbulkan bahaya dan kerugian pada pemakainya. Dikatakan aman apabila struktur tersebut mampu menahan beban yang mungkin lebih besar dari beban rencana dengan tidak mengesampingkan keekonomisan dan struktur tersebut. Agar stabilitasnya terjamin, balok sebagai bagian dari system yang menahan lentur dan geser harus kuat untuk menahan tegangan tekan, tarik dan menahan tegangan geser yang terjadi.

Adanya lubang pada penampang lateral balok beton bertulang untuk keperluan wadah instalasi mechanical dan electrical seperti instalasi AC sentral, listrik, supply air, pembuangan air kotor pada bangunan bertingkat akan mengurangi kekakuan dari struktur balok beton bertulang tersebut. Penentuan posisi lubang menjadi permasalahan. Untuk itu menjadi perhatian dalam menentukan rasio tulangan tunggal pada balok beton lubang tulangan tunggal. Pengaruh beban maksimum dan gaya geser yang tidak aman dan dapat diterapkan pasangan rasio tulangan tunggal pada balok beton lubang bertulangan tunggal yang aman sesuai fungsi tulangan dan yang sesuai hasil pengujian.

TINJAUAN PUSTAKA

Ujiyanto (2007) melakukan penelitian mengenai balok T beton bertulang untuk mempelajari pola retak dan jenis keruntuhan akibat pengaruh ukuran dan lokasi lubang balok beton bertulang akibat pembuatan lubang pada badan balok yang mensimulasikan beban mesin (beban siklik). Bahwa proses retak selalu diawali dengan retak lentur yang terjadi pada daerah yang mengalami momen lentur positif terbesar. Retak yang pertama terjadi ditengah bentang (mid span) balok pada sisi tarik, rata-rata saat beban mencapai 24,78% dari beban maksimum. Retak didaerah lubang terjadi setelah retak ditengah bentang akibat beban siklik atau beban statik saat first crack. Beban yang bekerja sebesar 37,13 KN. Proporsi retak atau kecepatan perambatan retak paling tinggi terjadi pada benda uji BL-01, ketika beban 16 KN panjang retakannya 24,6 cm.

Eksperimen Silalahi (2008) tentang balok beton berlubang mengkaji seberapa jauh perlemahan akibat adanya lubang pada balok beton jika dibandingkan dengan kekuatan teoritis balok utuh. Melakukan pengujian balok yang ditumpu pada perletakan sendi – rol dibebani oleh beban terpusat dengan lubang didaerah momen lentur terbesar, lubang didaerah kombinasi geser terbesar dan momen dan lubang dibawah beban terpusat. pengujiannya menunjukkan bahwa kekuatan balok beton dengan lubang di daerah momen lentur murni di bandingkan dengan kekuatan teoritis balok utuh tidak jauh

berbeda pada ukuran lubang dalam batas-batas tertentu, dan perlemahan kekuatan balok paling besar pada lubang yang terletak pada daerah kombinasi geser dan momen lentur.

Penelitiannya mengenai balok L beton bertulang berlubang dan tanpa lubang untuk mengetahui kapasitas beban maksimum dilakukan oleh Effendi, dkk. (2013). Sedangkan penelitian terhadap balok beton BLK-1 sebesar 24.000 Kg, BLK-2 sebesar 17.000 Kg, BLK-3 sebesar 23.500 Kg dari hasil pengujian Mretak hampir sama untuk semua yaitu 2500 Kg.m. Menurut perhitungan teoritis bahwa Mretak adalah 1533 Kg.m disebabkan krena retak dimulai dari retak mikro yang tidak dapat jelas dilihat dengan mata telanjang. Dapat diketahui bahwa keruntuhan balok yang berbahaya adalah keruntuhan akibat geser. Elemen balok diatas lubang tidak bersifat sebagai balok, karena hasil pengukuran regangan menunjukkan bahwa elemen tersebut mengalami tegangan tekan. Balok beton bertulang tampang persegi dengan lubang persegi akibat beban layan dan batas belum diteliti.

Studi pada balok beton bertulang penampang T berlubang memanjang, dan balok beton bertulang penampang T dengan flens bawah sebagai balok kontrol. Pengujian ini untuk mengetahui perilaku dan kekuatan geser pada keadaan layan maupun batas, lendutan, pola retak, daktilitas, frekwensi alami balok persegi, balok berlubang dan balok T dengan flens bawah. Tinjauan kekakuan, daktilitas, frekwensi alami dan arah pembebanan hanya dilakukan pada arah sumbu kuat. Penelitian ini memberikan solusi yang bermanfaat untuk mempermudah pemasangan dan pengerjaan baja tulangan dan bekesting, serta pemanfaatan balok beton berlubang memanjang sebagai pengganti balok beton berpenampang I atau balok beton T dengan flens bawah sebagai balok kontrol (Supriyadi dkk., 2010).

Untuk menjamin penampang balok beton bertulang memiliki pola keruntuhan daktil, maka penulangan dengan baja harus *underreinforced*. SNI 03-2847-2002 menetapkan batasan rasio baja tulangan (ρ) sebagai berikut:

$$\text{Rasio maksimum } (\rho_{\text{maks}}) = 0,75 \rho_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Rasio berimbang } (\rho_b) = 0,85 \beta_1 \left(\frac{f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{600}{600+f_y} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

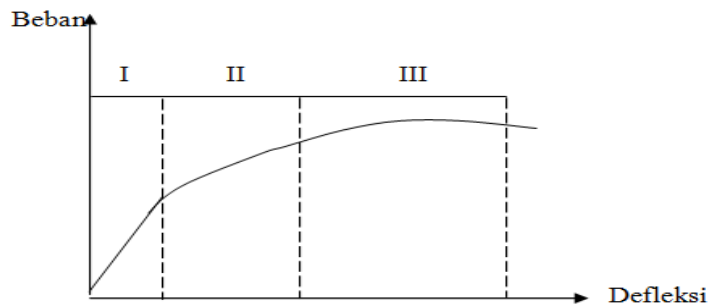
$$\text{Rasio minimum } (\rho_{\text{min}}) = \left(\frac{1,4}{f_y} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Batasan minimum ini berlaku untuk tulangan positif atau momen positif, kecuali luas baja tulangan minimum yang dipasang lebih besar daripada satu sepertiga luas yang dibutuhkan menurut analisis. Dan perkuatan kurang (*underreinforced*) termasuk keruntuhan tarik (*tension failure*) maka pembatasan rasio baja tulangannya berlaku adalah $\rho_{\text{min}} < \rho < \rho_{\text{maks}}$.

Beton bertulang terdiri dari dua material yang berbeda sifatnya, yaitu beton dan baja tulangan. Jika baja dianggap sebagai material homogen yang propertinya terdefinisi jelas, maka sebaliknya beton merupakan material yang heterogen. Beton terdiri dari semen, mortal, dan agregat batuan, yang properti mekaniknya bervariasi dan tidak terdefinisi dengan pasti. Hanya untuk memudahkan dalam analisa perhitungan, maka umumnya beton dianggap sebagai material homogen.

Perilaku keruntuhan yang dominan pada struktur balok beton pada umumnya adalah keruntuhan lentur, tentu saja itu akan terjadi jika rasio bentang (L) dan tinggi balok (h) cukup besar. Jika rasio L/h kecil. Maka digolongkan sebagai balok tinggi (deep beam), maka keruntuhan geser yang dominan.

Tipikal perilaku keruntuhan balok beton bertulang di atas dua tumpuan dapat digambarkan dalam bentuk kurva hubungan beban-lendutan yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan Beban-Lendutan Balok Beton Bertulang

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Struktur, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mataram. Semua balok memiliki penampang 150 mm x 250 mm dengan panjang balok 3050 mm dan diletakkan pada perletakan sederhana dengan bentang bersih 2750 mm. Balok direncanakan untuk gagal memikul beban melalui kegagalan lentur (*flexural mode failure*). Tiga jenis pemodelan yang digunakan pada benda uji balok dengan rasio tulangan perkuatan kurang (*under reinforced*). Selimut beton antara tulangan dengan tepi luar beton 25 mm untuk semua permukaan. Geometri dan detail benda uji ditampilkan pada Tabel 1.

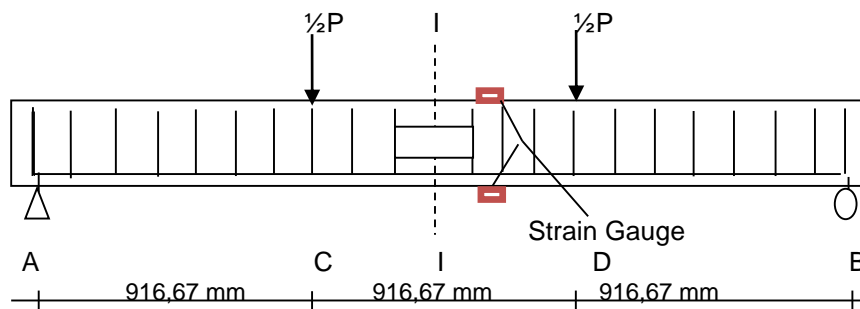
Tabel 1. Detail Benda Uji Balok Beton

Seri	Kode Balok	Dimensi (mm)	Tipe Balok	Jumlah Balok	Tulangan	Rasio Tulangan %
I	BBLKK	150x250x3050	R	1	2D13	0,707
			S	1	3D13	1,061
			T	1	5D13	1,769
II	BBLT	150x250x3050	R	1	2D13	0,707
			S	1	3D13	1,061
			T	1	5D13	1,769
III	BBLK	150x250x3050	R	1	2D13	0,707
			S	1	3D13	1,061
			T	1	5D13	1,769
IV	BBN	150x250x3050	S	1	3D13	1,061

Keterangan:

BBLKK = Balok Beton Lubang Kiri Kanan, BBLT = Balok beton Lubang Tengah, BBLK = Balok beton lubang kiri, BBN = Balok beton normal, R = Rendah, S = Sedang, T = Tinggi

Sket spesimen dengan 1 (satu) lubang tengah bentang ditampilkan pada Gambar 2. Agar menjadi lebih jelas, spesimen ini disajikan pula dalam bentuk foto seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Setup spesimen dengan lubang di tengah bentang



Gambar 3. Foto spesimen dengan lubang di tengah bentang

Setelah balok beton berumur 28 hari diuji dengan menggunakan mesin desak (Compression Testing Machine) dengan kapasitas 2500 Kg. Balok beton lubang di badan diletakkan pada dua perletakan sederhana dengan bentang 2750 mm. Dua beban terpusat di berikan pada balok uji yaitu pada jarak 916,67 mm dari tumpuan. Untuk mengukur regangan pada serat tekan ekstrim dan serat tarik ekstrim dipasang electrical strain gauge pada permukaan atas balok beton dan tulangan tarik ditengah bentang balok. Beban vertikal diberikan dengan sistem tekanan dari alat mesin desak (Compression Testing Machine). Nilai lendutan (defleksi), regangan tekan, regangan tarik, serta pola retak dicatat pada setiap tahap pembebanan sampai benda uji runtuh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perilaku Lentur Balok

Perilaku balok saat diberi beban menunjukkan bahwa pada saat beban masih kecil balok relatif kuat menahan beban yang ditandai dengan kecilnya defleksi yang terjadi. Semakin beban ditingkatkan mengakibatkan retak mulai muncul pada bagian ekstrim balok beton. Retak tersebut terus merambat ke arah vertikal seiring dengan penambahan beban. Semakin lama, jumlah retak yang terjadi juga bertambah yang mana tidak hanya retak yang lama membesar dan memanjang tetapi juga muncul retak-retak baru yang bergeser dari posisi retak awal ke arah luar. Pola retak yang terjadi juga merupakan ciri retak lentur yaitu arah retak yang tegak lurus sumbu penampang. Akhirnya setelah retak muncul semakin banyak maka balok kehilangan kekuatannya untuk menahan beban luar atau dikatakan balok sudah mengalami failure.

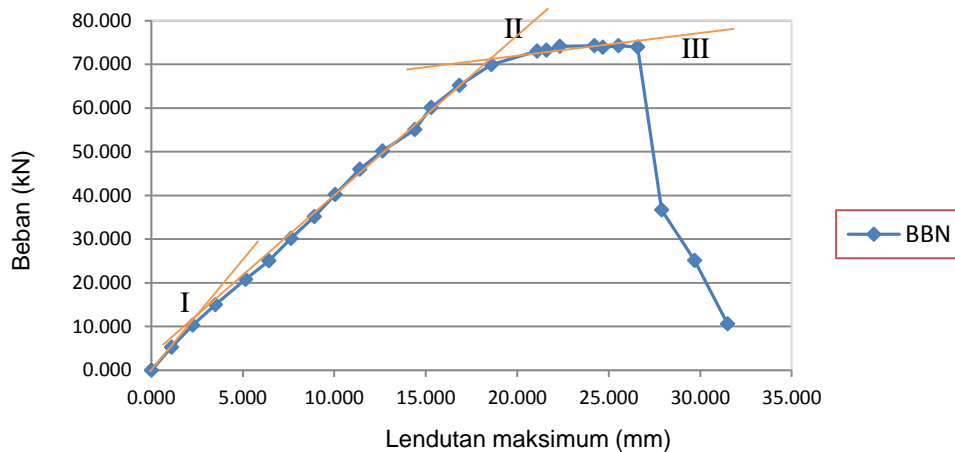
Diagram *Load-Deflection*

Terlihat pada diagram *Load-Deflection* dalam pengujian di laboratorium bahwa semua benda uji memiliki perilaku struktur dan kapasitas tahanan yang tidak jauh berbeda. Juga terlihat bahwa balok solid (tanpa rongga) mempunyai kemampuan dalam menahan beban yang paling baik. Kurva yang

menanjak pada awal pengujian menunjukkan *slope* yang merupakan kekakuan balok sebelum retak pertama terjadi. Karenanya nilai retak pertama sangat menentukan perilaku benda uji lentur. Disamping mendapatkan nilai-nilai momen retak, momen layan dan momen ultimit, diagram ini juga berguna untuk menentukan daktilitas balok.

Diagram *load-deflection* hasil pengujian balok dengan 9 (sembilan) rongga bola dan balok solid tanpa rongga disajikan masing-masing pada Gambar 3 dan Gambar 4. Sedangkan nilai-nilai hasil pengujian pada seluruh benda uji selengkapnya ditampilkan dalam Tabel 2 yang menunjukkan hubungan *load-deflection* pada beban layan dan beban runtuh (ultimit) masing-masing benda uji.

Untuk mengetahui perilaku balok yang mengalami beban lentur maka salah satu contoh balok spesimen digunakan untuk menjelaskannya. Balok BN dengan rasio 1.061 % diambil sebagai contoh. Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan hasil pengujian balok BN yang disajikan dalam gambar keretakan balok normal dan dalam grafik hubungan beban-lendutan.

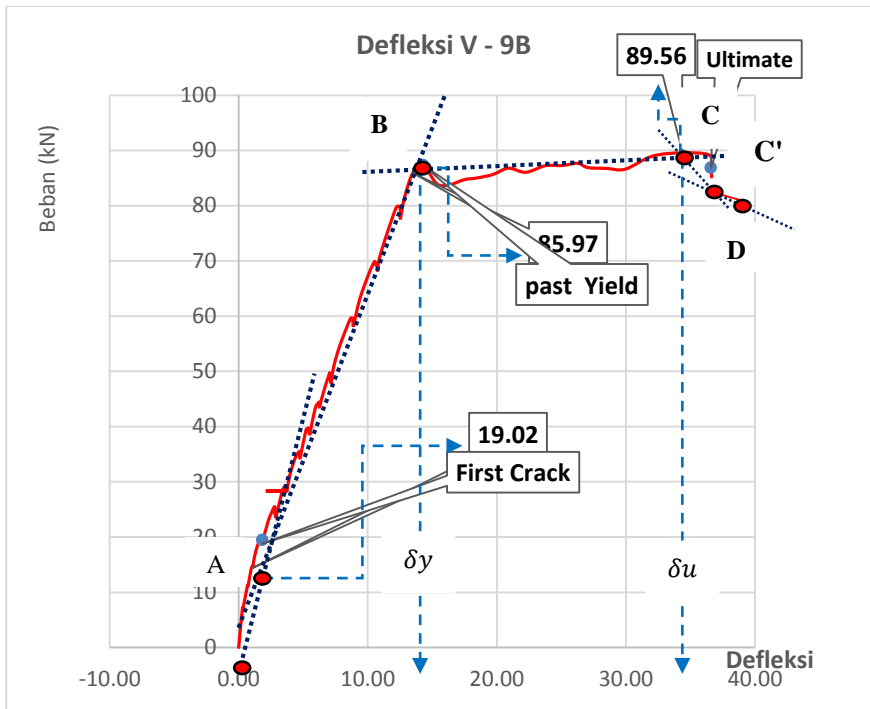


Gambar 4. Kurva beban-lendutan balok BN

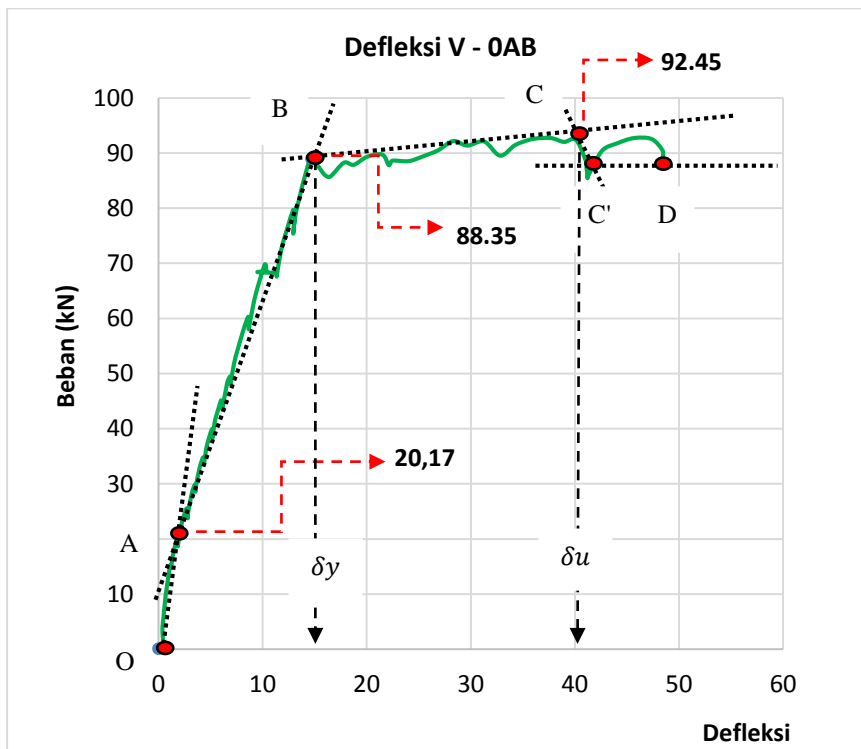
Nilai defleksi yang disajikan pada Gambar 4 adalah nilai bacaan defleksi maksimum ditengah bentang balok. Untuk balok ini beban diberikan secara meningkat dari 0 dengan kenaikan ± 5 kN dan kecepatan beban 0,1 KN/detik. Perpotongan Garis I dan II dalam Gambar 4-2 diidentifikasi sebagai posisi beban dimana retak pertama kali terjadi pada benda uji yaitu sekitar 10 kN. Beban terus ditingkatkan nilainya hingga kira-kira pada nilai 70 kN kurva mulai berbelok arah. Titik belok kurva ini di asumsikan sebagai perpotongan garis II dan III dalam gambar diatas, yang selanjutnya diidentifikasi sebagai posisi beban dimana regangan tulangan tarik sudah mengalami leleh. Pada kondisi ini secara visual pada benda uji balok terlihat jumlah retak yang semakin banyak. Setelah tulangan leleh kapasitas balok menahan beban mulai turun drastis seperti ditunjukkan dengan garis III yang mana beban tidak bisa meningkat lagi atau cenderung konstan dan hanya lendutan yang terus bertambah. Secara visual nampak pada benda uji balok lebar retak semakin menganga, tentu hal ini menyebabkan kekakuan balok semakin menurun drastis, sehingga kekuatan balok hilang secara drastis pula setelah nilai defleksi diatas 26 mm. Kapasitas tahanan maksimum balok ini sebesar lebih kurang 74 kN.

Nilai-nilai beban yang diperoleh dari grafik tersebut diperkirakan sebagai nilai beban-beban eksperimen berturut-turut beban retak pertama (P_{cr}), beban leleh (P_y) dan beban ultimit (P_u) sebesar 10 kN, 70 kN dan 74 kN.

Identik dengan Gambar 3 untuk balok lainnya dapat dicari nilai beban-beban eksperimen untuk masing-masing kondisi.



Gambar 5. Diagram Load-Deflection Balok dengan Sembilan Rongga



Gambar 6. Diagram Load-Deflection Balok Solid Tanpa Rongga

Tabel 2. Deflection pada Beban Layan (Py) dan Beban Runtuh (Pu)

Seri	Balok	Fc' (MPa)	Py (kN)	Pu (kN)	Δy (mm)	Δu (mm)	Daktilitas $\Delta u/\Delta y$
1	V-0AB	22,43	90,08	94,49	14,04	38,98	2,78
2	V-2A	21,57	85,56	90,82	14,36	35,80	2,49
3	V-3A	23,21	79,11	92,71	15,36	37,76	2,46
4	V-5A	22,08	84,37	91,49	15,14	36,76	2,41
5	V-7A	22,42	86,93	90,67	15,74	36,50	2,32
6	V-9A	22,68	85,74	92,71	16,50	37,68	2,28
7	V-2B	22,31	89,19	93,56	12,08	31,23	2,58
8	V-3B	21,95	85,67	90,71	12,42	30,06	2,42
9	V-5B	22,91	85,89	93,79	12,32	31,36	2,55
10	V-7B	21,11	85,26	91,23	12,65	33,05	2,61
11	V-9B	22,49	85,97	89,56	13,50	34,40	2,55

Tampak dari Tabel 2 daktilitas balok dengan rongga mengalami penurunan dibanding balok tanpa rongga. Namun demikian penurunan ini dianggap tidak signifikan. Daktilitas terendah yang dialami balok dengan rongga terjadi pada benda uji dengan 9 rongga sebesar 2,28. Dibanding balok tanpa rongga dengan daktilitas 2,78 balok dengan rongga mengalami penurunan sebesar 82%.

Perilaku Struktur

Tabel 3. Momen Retak, Momen Layan dan Momen Ultimit Eksperimen vs Teori

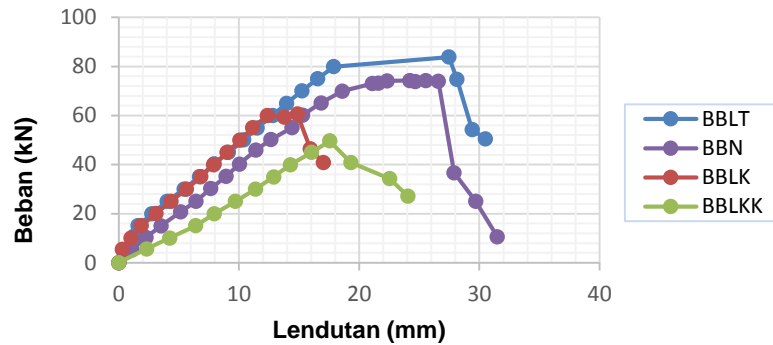
Seri	Balok	Fc' (MPa)	Mr (Exp) (kN.m)	Mr (Th) (kN.m)	My (Exp) (kN.m)	My (Th) (kN.m)	Mu (Exp) (kN.m)	Mu (Th) (kN.m)
1	V-0AB	22,43	10,085	8,24	45,04	36,51	47,25	46,49
2	V-2A	21,57	8,628	7,845	42,78	34,76	45,41	44,26
3	V-3A	23,21	10,415	7,762	44,60	35,95	46,78	45,78
4	V-5A	22,08	8,970	8,356	39,56	37,02	46,36	45,85
5	V-7A	22,42	9,210	7,622	42,84	35,01	45,36	44,59
6	V-9A	22,68	9,785	7,868	42,19	34,86	45,75	44,39
7	V-2B	22,31	9,165	8,164	42,95	36,17	46,90	46,06
8	V-3B	21,95	8,783	7,825	43,47	34,67	45,34	44,15
9	V-5B	22,91	9,915	7,367	42,63	34,19	45,62	43,57
10	V-7B	21,11	8,424	7,832	42,87	34,70	46,36	44,19
11	V-9B	22,49	9,51	7,44	42,99	34,41	44,78	41,17

Besarnya momen retak pertama (Mr), momen layan (My) dan momen ultimit (Mu) hasil eksperimen ditampilkan dalam Tabel 3. Dalam tabel tersebut juga dibandingkan hasil perhitungan momen-momen tersebut secara teoritis. Terlihat dalam tabel tersebut bahwa hasil eksperimen lebih besar dibanding perhitungan teoritis. Hal ini disebabkan dalam perhitungan teoritis kemampuan beton dianggap nol pada saat beton mulai retak. Rata-rata rasio nilai eksperimen terhadap nilai teoritis $Mr(\text{exp})/Mr(\text{th})$, $My(\text{exp})/My(\text{th})$ dan $Mu(\text{exp})/Mu(\text{th})$ berturut-turut adalah 1,28; 1,22 dan 1,05.

Dapat dilihat juga pada Tabel 3, terjadi penurunan kekuatan balok berongga dibanding balok tanpa rongga. Dibandingkan dengan balok tanpa rongga, kemampuan balok berongga dengan 9 bola dalam memikul beban mengalami penurunan sebesar 94%, 95%, dan 95% berturut-turut untuk Mr, My dan Mu. Besarnya penurunan ini dianggap tidak signifikan sehingga pemakaian balok berongga bola ini dapat direkomendasikan untuk diaplikasikan di lapangan.

Pengaruh Bukaannya Balok

Untuk mempelajari pengaruh keberadaan lubang pada badan balok yang selanjutnya disebut bukaan badan balok digunakan tipikal balok dengan rasio tulangan sedang (3D13). Alasannya adalah karena balok dengan rasio ini yang memiliki spesimen kontrol (BN) atau balok tanpa lubang.



Gambar 7. Variasi beban-defleksi benda uji

Berdasarkan Gambar 7 di atas terlihat bahwa balok tanpa lubang (BBN) lebih lemah baik kekuatan maupun kekakuannya dibanding salah satu balok berlubang. Hal ini difahami terjadi karena balok BBN memiliki mutu bahan yang lebih rendah dibandingkan mutu bahan balok lubang tengah (BBLT) yaitu masing masing sebesar 40 MPa dan 45 MPa seperti disajikan dalam Tabel 4 diatas. Bila kuat tekan sama maka idealnya balok BBN akan memiliki kekakuan dan kekuatan yang minimal sama atau lebih besar dibanding balok BBLT.

Yang menarik dalam Gambar 7 di atas adalah kurva BBLK hampir berimpit dengan kurva BBLT pada setiap titik hingga beban mencapai 60 kN. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kuat tekan beton balok BBLK hampir sama jika dibanding balok BBLT seperti terlihat pada Tabel 4 diatas.

Kekakuan Balok BBLK hampir sama dengan balok BBLT, kedua kurva menyimpang karena berkurangnya kekakuan balok BBLK. Balok BBLT dan balok BBLK mempunyai kekakuan yang hampir sama karena mempunyai jumlah lubang yang sama dengan letak lubang berbeda. Balok BBLKK lebih rendah kekakuannya dari balok BBLT dan balok BBLK karena mempunyai lubang lebih banyak.

Dari Tabel 6 menunjukkan dari ketiga rasio tulangan (rendah, sedang, tinggi) dengan titik lubang balok (BBLKK, BBLK, BBLT), nilai momen retak (M_{cr}) paling besar terjadi pada balok BBLKK rasio tinggi 1,769 %. sama besar dengan momen retak pertama (M_{cr}) balok (BBN), dengan perbandingan rasio 2,288. Rasio perbandingan momen retak exp ($M_{cr\ exp}$) dengan momen retak teori ($M_{cr\ th}$) paling besar terjadi pada balok BBLKK rasio tulangan tinggi 1,769 % dengan rasio perbandingan lentur sebesar 2,532.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Dari rangkaian pembahasan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan kekuatan balok beton bertulang dengan adanya rongga-rongga bola. Daktilitas balok dengan rongga mengalami penurunan dibanding balok tanpa rongga. Namun penurunan ini dianggap tidak signifikan. Daktilitas terendah yang dialami balok dengan rongga terjadi pada benda uji dengan 9 rongga sebesar 2,28. Dibanding balok tanpa rongga dengan daktilitas 2,78 balok dengan rongga mengalami penurunan sebesar 82%. Daya dukung balok berongga juga mengalami penurunan dibanding balok tanpa rongga. Dibandingkan dengan balok tanpa rongga, kemampuan balok berongga 9 bola dalam memikul beban M_r , M_y dan M_u berturut-turut mengalami penurunan sebesar 94%, 95%, dan 95%.

Saran

Disarankan rongga bola pada struktur balok beton bertulang diletakkan pada posisi di bawah garis netral balok atau pada bagian penampang yang menerima tegangan lentur positif. Pada posisi ini semua beban yang bekerja akan dipikul sepenuhnya oleh baja tulangan sehingga kehadiran rongga tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan struktur balok. Selanjutnya dapat direkomendasikan pemakaian balok berongga ini untuk diaplikasikan di lapangan karena besarnya penurunan kekuatan yang tidak signifikan, yaitu masih sekitar 95% dari kekuatan balok solid.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM, 2005, "**American Society for Testing and Materials**", USA
Dipohusodo, I, 1996, "**Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03**", Departemen Pekerjaan Umum RI, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta
Nawy, E.G., 2010 "**Beton Bertulang: Suatu Pendekatan Dasar**", Vol. 4, Terjemahan B. Suryoatmono, PT Refika Aditama Bandung
SNI 03-2847-2002, "**Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung**", Standar Nasional Indonesia, Departemen Kimpraswil, Jakarta
SNI 03-2847-2012, "**Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung**", Departemen Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta